

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Саратовского филиала ФГБУН
«Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН»
доктор физико-математических наук,
профессор

Ю.А. Филимонов

«22» октября 2017 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НИР ФГБОУ ВО
«Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»
доктор физико-математических наук,
профессор

А.А. Короновский

«22» октября 2017 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»

по диссертации Кульминского Данила Дмитриевича «Ансамбли хаотических генераторов с запаздывающей обратной связью (реконструкция, коллективная динамика и приложения)» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — «Радиофизика», выполненной на кафедре динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Министерства образования и науки Российской Федерации и в лаборатории моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН».

В период подготовки диссертации Кульминский Данил Дмитриевич являлся аспирантом очной формы обучения по специальности 03.06.01 «Физика и астрономия», направленности «Радиофизика», а также работал ассистентом на кафедре динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и младшим научным сотрудником в лаборатории моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН».

В 2014 г. Кульминский Д.Д. окончил ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по направлению 011200 «Физика» с присуждением квалификации «Магистр».

Справка об обучении Кульминского Д.Д. №85-2017 выдана 21 сентября 2017 года ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель: Прохоров Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и

электроники им. В.А. Котельникова РАН» представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на объединенном заседании кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.» и СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

На заседании присутствовали:

1. Селезнёв Евгений Петрович, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», заместитель директора СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
2. Безручко Борис Петрович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», член диссертационного совета по специальности 01.04.03 «Радиофизика»;
3. Шабунин Алексей Владимирович, д.ф.-м.н., профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики физического факультета ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», член диссертационного совета по специальности 01.04.03 «Радиофизика»;
4. Синицын Николай Иванович, д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора по научной работе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, член диссертационного совета по специальности 01.04.03 «Радиофизика»;
5. Пономаренко Владимир Иванович, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
6. Прохоров Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор РАН, заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
7. Смирнов Дмитрий Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор РАН, ведущий научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
8. Караваев Анатолий Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
9. Сатаев Игорь Рустамович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
10. Хорев Владимир Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
11. Сысоева Марина Вячеславовна, к.ф.-м.н., ассистент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института электронной техники и машиностроения ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.»;
12. Сидак Елена Владимировна, к.ф.-м.н., ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
13. Астахов Олег Владимирович, ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

14. Сказкина Виктория Викторовна, инженер кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

Слушали доклад Кульминского Д.Д., изложившего основное содержание и результаты диссертационной работы.

Докладчику были заданы вопросы от Безручко Б.П., Шабунина А.В., Синицина Н.И., Смирнова Д.А., Астахова О.В., Сысоевой М.В.

Рецензенты диссертации:

Шабунин Алексей Владимирович, д.ф.-м.н., профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики физического факультета ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», член диссертационного совета по специальности 01.04.03 «Радиофизика» представил положительный отзыв.

Сидак Елена Владимировна, к.ф.-м.н., ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» представила положительный отзыв.

Смирнов Дмитрий Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор РАН, ведущий научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН представил положительный отзыв.

Сатаев Игорь Рустамович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН представил положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации единогласно принято следующее

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Диссертация Кульминского Д.Д. посвящена разработке методов восстановления по временным рядам архитектуры связей и параметров элементов в ансамблях связанных осцилляторов, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздыванием, исследованию особенностей коллективной динамики осцилляторов в ансамблях бистабильных систем с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле, а также разработке и созданию систем скрытой передачи информации на основе хаотических систем с запаздыванием.

Тема диссертации утверждена Учёным советом факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета 14 апреля 2016 года (протокол №9).

Научная новизна работы.

Предложен метод идентификации структуры взаимодействий и оценки собственных параметров элементов в ансамблях связанных систем с задержкой, основанный на минимизации специальным образом введенной целевой функции.

Впервые исследовано влияние инерционных свойств и запаздывания общего поля на коллективную динамику осцилляторов в ансамбле идентичных бистабильных систем с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле. Обнаружены и исследованы многочисленные колебательные режимы в таком ансамбле.

Предложены и экспериментально реализованы новые системы передачи информации на основе синхронизации хаотических генераторов с запаздыванием.

Исследована эффективность разработанных систем связи при расстройке параметров приемника и передатчика, наличии шума и затухании сигнала в канале связи.

Предложен метод для диагностики обобщенной хаотической синхронизации между связанными автоколебательными системами, не требующий использования вспомогательной системы.

Научное и практическое значение результатов работы.

Предложенный в диссертационной работе метод реконструкции ансамблей связанных систем с запаздыванием позволяет определить структуру взаимодействий и восстановить с высокой точностью собственные параметры всех осцилляторов ансамбля, включая времена запаздывания, параметры инерционности, нелинейные функции и коэффициенты связи. Метод обладает высоким быстродействием и применим для восстановления ансамблей, состоящих из неидентичных систем с запаздыванием с произвольным числом однонаправленных и взаимных связей между ними, в том числе при умеренных уровнях шума.

Выявлены особенности коллективной динамики осцилляторов в ансамбле идентичных бистабильных генераторов с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле. Показано, что изменяя параметры общего поля, можно управлять поведением осцилляторов в ансамбле и контролировать колебательные режимы, в том числе состояния «химера». Обнаруженные особенности состояний «химера» могут оказаться полезными для объяснения ряда феноменов реального мира, поскольку глобальная связь осцилляторов является достаточно распространенной в многоэлементных системах различной природы, а запаздывание присуще многим объектам и процессам.

Разработаны экспериментальные системы передачи информации на основе синхронизации хаотических генераторов с запаздыванием, которые позволяют повысить устойчивость к шуму и к затуханию сигнала в канале связи по сравнению с другими экспериментальными системами передачи информации, использующими хаотическую синхронизацию для передачи скрытого сообщения через аналоговый канал связи.

Разработанные системы передачи информации обладают такими преимуществами, как относительная простота технической реализации, способность маскировать и выделять информационный сигнал в реальном времени с небольшой задержкой, возможность скрытия не только самой информации, но и факта ее передачи. Практическое применение таких систем передачи может быть востребовано в сфере проводной и беспроводной служебной связи охранных структур, а также при конфиденциальной передаче информации коммерческого значения и биомедицинских данных.

Предложена схема связи на основе обобщенной синхронизации без использования вспомогательной системы в приемнике, что позволило избежать технических трудностей создания систем передачи информации на основе обобщенной синхронизации, связанных с необходимостью обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике.

Положения, выносимые на защиту:

1) Предложенный метод восстановления архитектуры связей и собственных параметров элементов в ансамблях связанных осцилляторов, моделируемых дифференциальными уравнениями первого порядка с запаздыванием, основанный на минимизации целевых функций, описывающих результат реконструкции каждого осциллятора ансамбля, и разделении восстановленных коэффициентов связи на значимые и незначимые, обеспечивает высокое качество реконструкции времен запаздывания,

параметров инерционности, нелинейных функций и коэффициентов связи между элементами ансамбля по хаотическим временным рядам их колебаний.

2) В ансамбле идентичных бистабильных осцилляторов с запаздыванием, связанных между собой через общее поле, при соответствующем выборе параметров и начальных условий формируется два кластера, в одном из которых осцилляторы совершают колебания на основной моде, а в другом на третьей гармонике основной моды. Изменяя параметры общего поля, можно управлять поведением осцилляторов внутри кластеров и получать колебательные режимы, при которых осцилляторы демонстрируют синхронное поведение в обоих кластерах, осцилляторы в обоих кластерах колеблются несинхронно, осцилляторы в одном из кластеров синхронны, а в другом кластере несинхронны.

3) Разработанная система передачи информации, основанная на использовании режима обобщенной синхронизации и содержащая лишь одну ведомую автоколебательную систему в приемнике, позволяет избежать технических трудностей при построении систем связи на основе обобщенной синхронизации, обусловленных необходимостью обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике. Диагностику режима обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами в предложенной схеме связи можно осуществить, воздействуя на ведомую систему поочередно хаотическим сигналом ведущей системы и задержанной копией этого сигнала.

Личный вклад соискателя.

Основные результаты диссертации получены автором лично. Автором были созданы экспериментальные установки ансамблей генераторов с запаздывающей обратной связью, а также лабораторные макеты систем передачи информации. Планирование и постановка экспериментов осуществлялись совместно с научным руководителем и другими соавторами. В совместных работах автором выполнялись экспериментальные измерения и компьютерные расчеты, включая обработку экспериментальных данных. Постановка задач, разработка методов их решения, выбор объектов исследования, объяснение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с руководителем и другими соавторами.

Апробация работы и публикации.

Результаты были представлены и обсуждались на всероссийской школе «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2016); международных школах «Хаотические автоколебания и образование структур» – ХАОС (Саратов, 2013, 2016); всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (Можайск, 2013); научных конференциях «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017); всероссийской школе-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы электроники СВЧ и ТГц диапазонов» (Саратов, 2015); всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2015); на международной конференции «Conference on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES 2015)» (Комо, Италия, 2015); на научных семинарах Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Проведенные исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований, Российским научным фондом, фондом некоммерческих программ «Династия».

По теме диссертации опубликовано 23 работы (12 статей в рецензируемых журналах, 11 тезисов докладов и статей в сборниках).

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

- [1] Ponomarenko V.I., Kulminskiy D.D., Prokhorov M.D. Chimeralike states in networks of bistable time-delayed feedback oscillators coupled via the mean field // *Phys. Rev. E*. –2017. – V. 96. –022209.
- [2] Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Kulminskiy D.D., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization // *Nonlinear Dynamics*. –2017. – V. 87.–№. 3. –P. 2039–2050.
- [3] Пономаренко В.И., Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Прохоров М.Д. Коллективная динамика идентичных бистабильных автогенераторов с запаздыванием, связанных через общее поле // *Письма в ЖТФ*. –2017. –Т. 43. –В. 6. –С. 64–71.
- [4] Sysoev I.V., Ponomarenko V.I., Kulminskiy D.D., Prokhorov M.D. Recovery of couplings and parameters of elements in networks of time-delay systems from time series // *Phys. Rev. E*. – 2016. –V. 94. –052207.
- [5] Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Караваев А.С., Прохоров М.Д. Устойчивая к шумам система скрытой передачи информации на хаотическом генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки // *ЖТФ*. –2016. –Т. 86. –В. 5. –С. 1–8.
- [6] Сысоев И.В., Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Восстановление по временным рядам архитектуры связей и параметров элементов в ансамблях связанных осцилляторов с задержкой // *Известия вузов Прикладная нелинейная динамика*. –2016. – Т. 24. –№. 3. –С. 21–37.
- [7] Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П. Система передачи информации, основанная на обобщенной хаотической синхронизации // *Информационно-управляющие системы*. –2016. –№ 2. –С. 35–40.
- [8] Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Коллективная динамика в ансамбле генераторов с запаздывающей обратной связью с общим полем // *Нелинейный мир*. –2016. –Т. 14. –№ 1. –С. 30–31.
- [9] Karavaev A.S., Kulminskiy D.D., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. An experimental communication scheme based on chaotic time-delay system with switched delay // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. –2015. –V. 25. –№. 10. –1550134.
- [10] Караваев А.С., Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Экспериментальная система скрытой передачи информации на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов // *Письма в ЖТФ*. –2015. –Т. 41. –В. 1. –С. 3–11.
- [11] Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D. An experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay system // *Nonlinear Dynamics*. – 2013. –V. 74.–N. 4. –P. 1013–1020.
- [12] Караваев А.С., Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Система цифровой передачи информации маскируемой хаотическим сигналом системы с запаздыванием // *Информационно-управляющие системы*. –2013. –№4. –С. 30–35.

Прочие публикации по теме диссертации:

- [13] Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Караваев А.С., Хорев В.С., Прохоров М.Д. Коллективная динамика идентичных бистабильных автогенераторов с запаздывающей обратной связью, связанных через общее поле // *Материалы XI Международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС)»*, Саратов, Россия. –2016. –С. 62–63.

- [14] Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Караваев А.С., Прохоров М.Д. Система связи на генераторе с запаздыванием с переключением хаотических режимов // Доклады IX Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, Россия. –2015. –С. 85–90.
- [15] Prokhorov M.D., Kulminskiy D.D., Karavaev A.S., Ponomarenko V.I. Communication system based on chaotic delayed feedback oscillator with switched delay // Proceedings of the 14th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science, Las Vegas, USA. –2015. –P. 119–124.
- [16] Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Скрытая передача данных в медицинских информационных системах, основанная на хаотических генераторах // Бюллетень медицинских Интернет-конференций –2015. –Т. 5. –№ 11. –С. 1411–1415.
- [17] Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Широкополосная система передачи информации на основе генератора с запаздыванием с переключаемым временем задержки // Материалы Всероссийской школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы электроники СВЧ и ТГц диапазонов», Саратов, Россия. –2015. –С. 68.
- [18] Кульминский Д.Д., Караваев А.С. Цифровая система передачи информации на генераторе хаоса с запаздывающей обратной связью, реализованном на микроконтроллере // Тезисы докладов II Всероссийской научной молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники», Уфа, Россия. –2014. –С. 24.
- [19] Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Экспериментальная система скрытой передачи информации с хаотической несущей с переключением задержки // Тезисы докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», Саратов, Россия. –2014. –С. 87–88.
- [20] Prokhorov M.D. Ponomarenko V.I., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D. Experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay // Proceedings of International Conference on Information and Communications Technologies, Beijing, China. –2013. –V.1. –P. 164–168.
- [21] Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Селезнев Е.П., Пономаренко В.И. Экспериментальная система скрытой передачи информации на гибридном генераторе с запаздыванием с переключением хаотических режимов // Материалы X Международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС), Саратов, Россия. –2013. –С. 38–39.
- [22] Глуховская Е.Е., Караваев А.С., Кульминский Д.Д. Система скрытой передачи на базе гибридного генератора с запаздыванием с модуляцией задержки // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», Саратов, Россия. –2013. –С. 72–73.
- [23] Кульминский Д.Д., Глуховская Е.Е., Караваев А.С. Оценка надежности скрытия информации в системе с нелинейным подмешиванием на базе хаотического генератора с запаздыванием // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», Саратов, Россия. –2012. –С. 81–82.

Диссертационная работа Кульминского Д.Д. представляет собой целостное исследование важных научных проблем и удовлетворяет требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание учёной степени кандидата наук.

Диссертация «Ансамбли хаотических генераторов с запаздывающей обратной связью (реконструкция, коллективная динамика и приложения)» Кульминского Даниила Дмитриевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Заключение принято на объединенном заседании кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН». Присутствовало на заседании 14 человек, из них с правом решающего голоса 7 докторов наук и 5 кандидатов наук по профилю диссертации. Результаты голосования: «за» - 12 чел.; «против» - 0 чел.; «воздержалось» - 0 чел.; (протокол №1 объединенного заседания кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» и СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН от «06» октября 2017 г.).

Председатель заседания:

д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», заместитель директора Саратовского филиала ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Селезнёв Евгений Петрович

